УДК 628.517.2: 51–74
DOI 10.23947/2541-9129-2017-3-2-17

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ШУМА НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

И. В. Богданова, И. Н. Лоскутникова, К. А. Заяшникова

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

bogirka@gmail.com;
Lvica.inna@yandex.ru
kristall-net7@yandex.ru

Представлено исследование формирования акустических полей в производственном помещении механического участка инструментального цеха машиностроительного предприятия. Исследование состояло из нескольких этапов: математического расчета уровней звукового давления (УЗД) в диффузном звуковом поле с применением программной среды *Microsoft Excel*, в ходе которого были получены значения УЗД в 85 точках помещения; разработки комплексной математической модели распространения звука в производственном помещении с использованием среды *Mathcad Application*; формулировки рекомендаций по применению полученной модели. Модель разработана в программной среде PTC *Mathcad Application* версии 15.0 и оптимизирована для решения основных инженерных задач специалиста по охране труда при проведении акустических расчетов. Разработка включает как программные настройки, так и итоговые 3*D*-графики.

Ключевые слова: акустика, шум, диффузное поле, математическая модель, *Mathcad*.

Введение. Среди наиболее распространенных вредных производственных факторов на протяжении многих десятилетий

UDC 628.517.2: 51–74
DOI 10.23947/2541-9129-2017-3-2-17

INVESTIGATION OF NOISE PROPAGATION PROCESS THROUGH INTEGRATED MATHEMATICAL MODEL

I. V. Bogdanova, I. N. Loskutnikova, K. A. Zayashnikova

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

bogirka@gmail.com;
Lvica.inna@yandex.ru
kristall-net7@yandex.ru

The article provides the study of the formation of acoustic fields in the production space of the mechanical area of the tool room of the machine-building enterprise. The study consists of several stages: mathematical calculation of sound pressure levels (SPL) in a diffuse sound field, during which the values of SPL in 85 points of the room were obtained using the Microsoft Exel software environment; development of an integrated mathematical model of sound propagation in a production space using Mathcad Application; formulation of the recommendations on the application of the model obtained. The model is developed in the software of PTC Mathcad Application, version 15.0 and is optimized for the solution of the basic engineering tasks of the occupational safety specialist when performing acoustic calculations. The development includes both software settings and final 3D graphics.

Keywords: acoustics, noise, diffuse field, mathematical model, Mathcad.

Introduction. For many decades, scientists consider noise effects among the most common

ученые особо выделяют шумовые эффекты [1]. Это связано с тем, что отрицательное влияние шума сказывается как на человеческом организме, так и на качестве производственного процесса — прослеживается снижение производительности труда, снижается экономическая эффективность предприятия [2].

Известно большое количество технологических процессов и производств, которые сопровождаются повышенным уровнем шума. Повсеместно, в технологических и конструкторских бюро, компьютерных классах и вычислительных центрах, сборочных, гальванических цехах для создания оптимальных и допустимых параметров воздушной среды используются кондиционеры и вентиляционные устройства, которые являются источниками шума аэродинамического, электромагнитного и механического характера. При древо- и металлообработке среди источников шума выделяют станочный инструмент и оборудование, взаимодействующее с заготовкой (электромеханические и пневматические приводы станков, несбалансированные щетки и роторы электродвигателей, резцы, фрезы, свёрла, пилы и т. п.) [3]. Широкий перечень таких производственных процессов позволяет сделать вывод о том, что проблема исследования шума и его снижения на сегодняшний момент не теряет своей актуальности, несмотря на достаточное количество существующих средств и методов её решения.

Существенным аспектом при решении данной проблемы является интегрирование общеизвестных акустических расчетов в информационную среду с целью исключения влияния человеческого фактора (ошибки) на конечные результаты и увеличения скорости обработки информации многоэлементных и многофакторных расчетов. В целях повышения качества подготовки специалистов

occupational hazards. [1]. This is connected with the fact that the negative impact of noise influence human body and the quality of the production process — we can see the decrease in labor productivity and in economic efficiency of enterprises [2].

There is a large number of technological processes and productions, which are accompanied by the increased noise. Air conditioners and ventilation devices which are sources of aerodynamic, electromagnetic and mechanical noise, are used everywhere, in technological and design departments, computer rooms and data centers, assembly rooms and galvanizing rooms to create the optimal and permissible parameters of air pollution. In woodworking and metalworking among the noise sources, we usually separate machining tools and equipment that interacts with the workpiece (electromechanical and pneumatic drives of machine tools, unbalanced brushes and rotors of electric motors, cutters, mills, drills, saws, etc.) [3]. A wide list of such production processes allows us to conclude that the problem of the study of noise and its reduction at the moment does not lose its relevance, despite a sufficient number of existing tools and methods to resolve it.

An essential aspect in solving this problem is the integration of well-known acoustic calculations in the information environment in order to eliminate the influence of the human factor (errors) on the results and to increase the speed of information processing of multi-element and multi-factor calculations. In order to improve the quality of training of specialists on labor protection, the

по охране труда авторы считают необходимыми разработку и применение комплексной математической модели с использованием компьютерно-информационной среды. Данная модель должна соответствовать основным положениям статистической теории акустики, отражать реальную шумовую ситуацию, представлять в графическом виде результаты моделирования. Целесообразно применение модели как в начале акустических расчётов, так и при контроле эффективности выбранных средств защиты.

Расчет УЗД в исследуемом помещении. Исследование и прогнозирование шума на производстве позволяет вычислить уровень звукового давления в любой точке помещения и определить параметры пространственного распределения звука, следовательно, способствует принятию эффективных решений относительно мер по защите от шума [4].

На рассматриваемом механическом участке были выделены девять источников шума (ИШ), причем наиболее высокий уровень шума отмечен в ИШ1 (станок токарно-центровой 1К625), ИШ6 (листогиб автоматический УВ-1800) и ИШ7 (станок отрезной для пьезокварцевых пластин, 8А607). Эти объекты были исследованы в рамках данной работы (рис. 1).

authors consider necessary to develop and to apply integrated mathematical models using computer-information environment. This model must comply with the main provisions of the statistical theory of acoustics; reflect the real noise situation, present graphically the simulation results. It is advisable to use this model in the beginning of the acoustic calculations as well as in monitoring of the effectiveness of the selected protection equipment.

Calculation of sound pressure level in the study area. The study and prediction of noise at production site allows us to calculate the sound pressure level in any place of the room and to define the parameters of spatial distribution of sound, therefore, it contributes to the effective decision-making concerning measures for protection from noise [4].

In the mechanical area were identified nine noise sources (NS), with the highest noise level recorded in NS 1 (center lathe 1K625), NS 6 (automatic bending machine УВ -1800) and NS 7 (machine for cutting quartz plates 8A607). These objects were investigated in this work (Fig. 1).

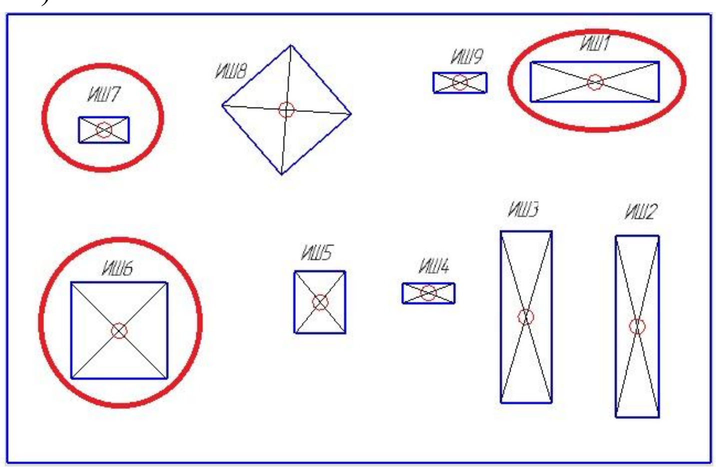


Рис. 1. План механического участка инструментального цеха машиностроительного предприятия с выделением ИШ с наибольшими уровнями звукового давления

Fig. 1. Plan of the tool room mechanical area of the machine-building enterprise with allocation of NS with the highest sound pressure levels.

При стандартных расчётах вычисляют уровни звукового давления (УЗД) в одной, двух либо трёх расчётных точках (РТ) (в зависимости от предъявляемых требований и условий диффузности поля). В данном случае, когда расчёты служат альтернативой эксперименту, количество РТ должно быть необходимым и достаточным для построения поля шума [5], но при этом соответствующим нормативным документам по измерению шума.

На плане участка были определены условные расчётные «точки измерения», с учетом стандартов [5–7]. Для измерения характеристик постоянного шума на участке были построены три координатные системы [8]. Начало координат каждой системы — точки, расположенные в центре соответствующего станка [8]. От горизонтальной линии каждого станка были проведены лучи под углом 45 градусов. Затем определены точки для расчета УЗД:

- первые расчётные точки — на расстоянии 1 м от станка в направлении каждого луча;
- последующие расчетные точки — в направлении каждого луча с шагом 2 м.

Каждая точка была обозначена с помощью трёхразрядной комбинации чисел — *X.X.X.* Первому разряду соответствует номер станка (1, 6, 7); второму — номер луча, вдоль которого располагается точка (от 1 до 4); третьему — номер точки «измерения» (от 1 до 10). Таким образом, авторы получили 85 точек на территории участка (рис. 2).

In the standard calculations, we find the sound pressure levels (SPL) in one, two or three reference points (RP) (depending on the requirements and conditions of field diffuseness). In this case, when the calculations serve as an alternative experiment, the number of RP must be necessary and sufficient to build the noise field [5], but at the same time correspond to regulatory documents on noise measurement.

The reference "points of measurement" were determined on the site plan taking into account standards [5-7]. To measure characteristics of continuous noise, three coordinate systems were built at the site [8]. The coordinate origin of each system is the point, located in the center of the corresponding machine [8]. From the horizontal line of each machine the rays at an angle of 45 degrees were constructed. Then the points to calculate SPL were determined:

- the first reference points at a distance of 1 m from the machine in the direction of each beam;
- follow-up reference points in the direction of each beam in increments of 2 m.

Each point was denoted with three-digit combinations of numbers — X.X.X. First category corresponds to the number of the machine (1, 6, 7); the second is the number of the beam, along which lays the point (1 to 4); third — the measure point number (1 to 10). Thus, the authors have received 85 points on the site (Fig. 2).

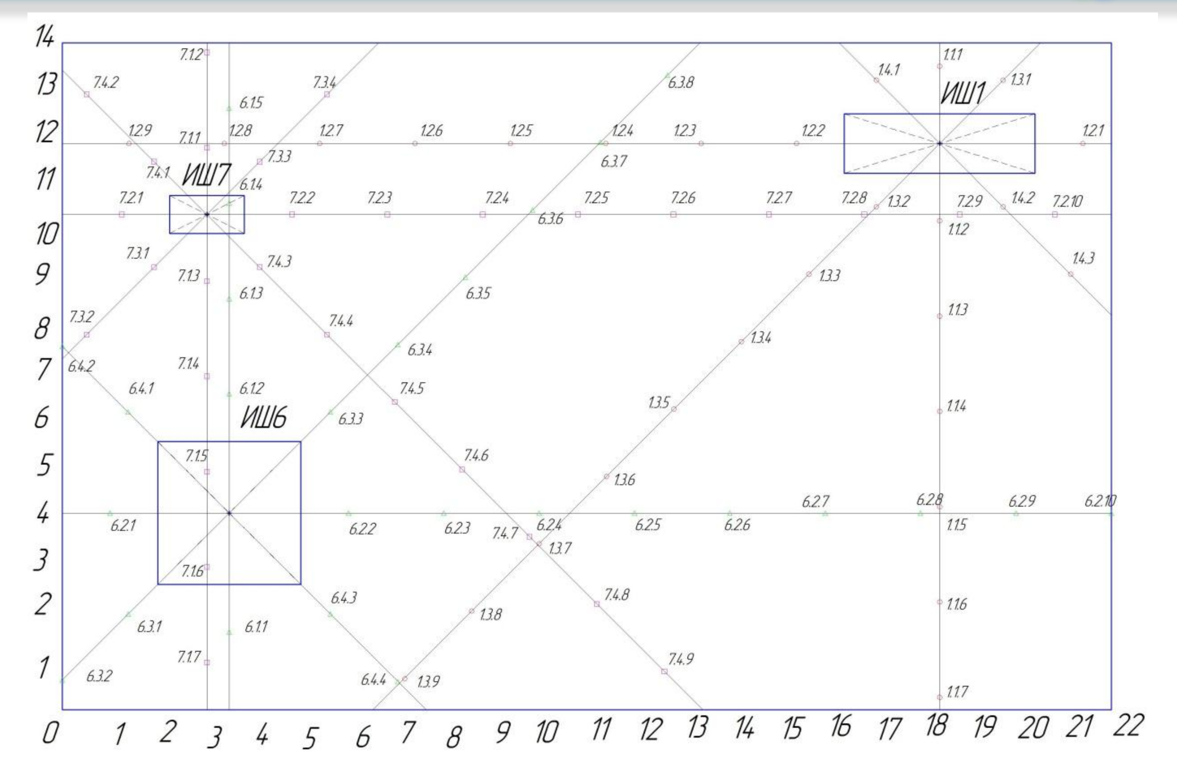


Рис. 2. Схема расположения расчетных точек

Fig. 2. Reference points location scheme

Помещение является соразмерным, поле шума рассматриваемого участка считаем идеально диффузным, акустическая мощность источников, одновременно излучающих звуковую энергию, является постоянной [2]. Для определения октавных уровней звукового давления L_p в дБ в РТ помещения в зоне прямого и отраженного звука [3] используем выражение (1):

$$L_p = 10\lg\left(\sum_{i=1}^{m}\frac{10^{0,1L_{W_i}}\chi_i\Phi_i}{S_i} + \frac{4\psi\cdot(1-\alpha_i)}{\alpha_i\cdot S_{огр_i}}\sum_{i=1}^{n}10^{0,1L_{W_i}}\right) \qquad (1)$$

В формуле (1) важными исходными данными являются расстояния от РТ до акустических центров ИШ, которые были заранее рассчитаны для каждой точки. Остальные переменные выражения (1) изменяются в каждой выбранной точке и отражаются в результатах расчёта.

Акустический расчет было решено провести с использованием программного продукта *Microsoft Excel* 2010, функции которого отвечают поставленным требованиям к

The room is proportionate, the field noise of the proposed location is believed to be diffuse, the acoustic power of sources simultaneously radiating the sound energy is constant [2]. To determine the octave sound pressure levels L_p in dB in RP of the facilities in the area of direct and reflected sound [3] we use the expression (1):

$$L_p = 10\lg\left(\sum_{i=1}^{m}\frac{10^{0,1L_{W_i}}\chi_i\Phi_i}{S_i} + \frac{4\psi\cdot(1-\alpha_i)}{\alpha_i\cdot S_{огр_i}}\sum_{i=1}^{n}10^{0,1L_{W_i}}\right) \qquad (1)$$

In the formula (1) the distance from the RP to the acoustic centers of the NS is an important input data which was pre-calculated for each point. Other variables of the expression (1) change in each selected point and are reflected in the calculation results.

The acoustic calculation was solved using *Microsoft Excel* 2010, functions of which meet the requirements to mathematical and, in

точности математических и, в частности, акустических расчётов. В выбранной среде был составлен шаблон акустического расчёта РТ, который представляет собой книгу *Microsoft Excel*. Шаблон использовался для получения численных значений УЗД во всех точках по формуле (1) [3]. Особенность данного шаблона состояла в операторском контроле значения коэффициента χ, изменяющегося по графику, и значения коэффициента *m*, зависящего от минимального *r* [2].

На рис. 3 приведён скриншот результатов расчета уровней звукового давления в точке № 1.2.4.

particular, acoustic calculations precision. The pattern of acoustic calculation of RP was built in the selected medium, which is a *Microsoft Excel* book. The pattern was used to obtain the numerical values of SPL in all points according to the formula (1) [3]. The peculiarity of this pattern was in the operator control of the value of the coefficient χ, varying from a plot, and the values of the coefficient *m* depending on the minimum *r* [2].

Fig. 3 shows a screenshot of the results of calculation of sound pressure levels at the point no. 1.2.4.

K26 fx =10*LOG(K22+(K24*K9))

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	124	r1	r6	r7			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
2	r	7,00	11,07	8,50		L1	94	94	96	97	99	95	87	80
3						L6	103	105	106	104	101	95	92	90
4		1	6	7		L7	81	83	89	86	91	92	83	86
5	Imax	3,212	2,1	1										
6						10^0,1*L1	2,5E+09	2,5E+09	4E+09	5E+09	7,9E+09	3,2E+09	5E+08	1E+08
7		1	6	7		10^0,1*L6	2E+10	3,2E+10	4E+10	2,5E+10	1,3E+10	3,2E+09	1,6E+09	1E+09
8	r/Imax	2,18	5,27	8,50		10^0,1*L7	1,3E+08	2E+08	7,9E+08	4E+08	1,3E+09	1,6E+09	2E+08	4E+08
9						Σ	2,3E+10	3,4E+10	4,5E+10	3,1E+10	2,2E+10	7,9E+09	2,3E+09	1,5E+09
10	χ	1	1	1										
11							63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
12		1	6	7		μ	0,5	0,5	0,55	0,7	1	1,6	3	6
13	S	87,96	139,11	106,81		B	53,9	53,9	59,29	75,46	107,8	172,48	323,4	646,8
14														
15	A	B	H			B/Sограждения	0,05	0,05	0,05	0,07	0,10	0,15	0,29	0,58
16	22	14	7			ψ	1	1	1	1	1	1	0,9	0,7
17														
18	Vпомещ	2156			((10^0,1L)*x*Ф)/S	1 ч.ур.	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
19	B1000	107,8				1	2,9E+07	2,9E+07	4,5E+07	5,7E+07	9E+07	3,6E+07	5697602	1136821
20	Sогражд	1120				6	1,9E+08	3E+08	3,7E+08	2,4E+08	1,2E+08	3E+07	1,5E+07	9362055
21	5*rmin	35,00				7	904987	1434308	5710084	2861821	9049874	1,1E+07	1434308	2861821
22						сум	2,2E+08	3,3E+08	4,2E+08	3E+08	2,2E+08	7,7E+07	2,2E+07	1,3E+07
23	n	3												
24	m	3			4ψ/B	2 ч.ур.	0,07421	0,07421	0,06747	0,05301	0,03711	0,02319	0,01113	0,00433
25														
26						Итого L	92,77	94,58	95,36	92,82	90,11	84,16	76,76	72,98
27														
28						Lдоп	99	92	86	83	80	78	76	74
29						снижен	-6,23	2,58	9,36	9,82	10,11	6,16	0,76	-1,02
30														
31														
32														

113 114 115 116 117 121 122 123 124 125 126 127 128 129 131

Рис. 3. Расчёт уровней звукового давления в точке № 1.2.4

Fig. 3. Calculation of sound pressure levels at the point No. 1.2.4

Таким образом были определены УЗД по всем октавным полосам в 85 РТ. Для удобства по рассчитанным данным была составлена графическая модель (линии уровня) механического участка, отображающая значения всех РТ и представленная на рис. 4.

Thus SPL were determined for all octave bands in 85 RP. For convenience, the calculated data was compiled in a graphical model (level line) of the mechanical area that displays the values of all RP and is shown in Fig. 4.

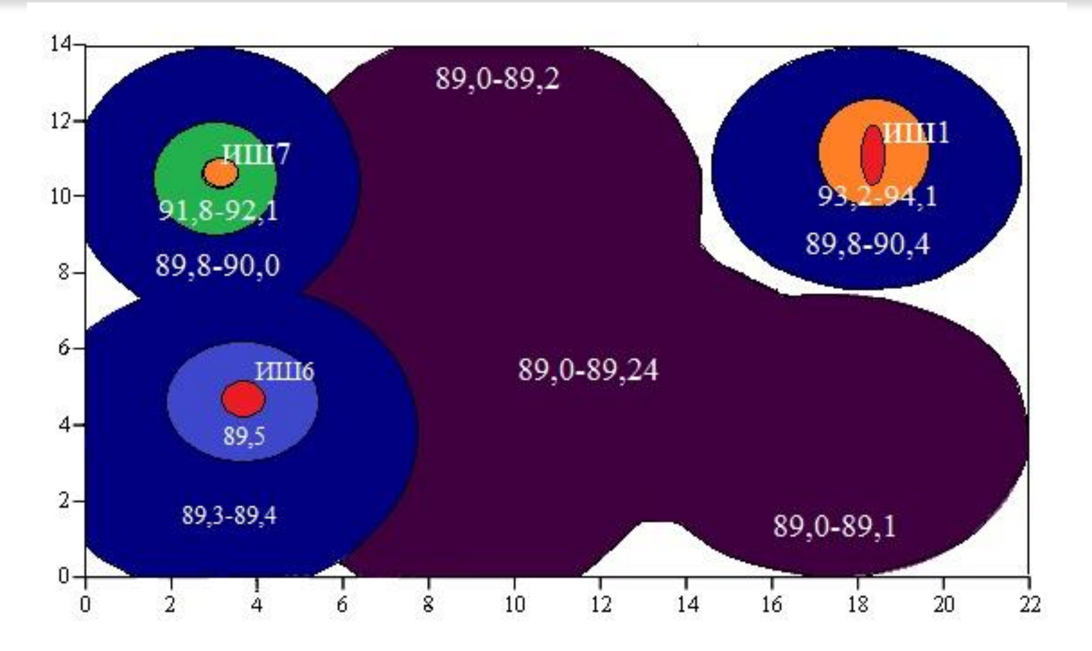


Рис. 4. Линии уровня рассчитанных УЗД

Fig. 4. Level lines of the calculated SPL

Данная графическая модель является общим полем распространения шума на исследуемом участке. Стоит отметить, что поля шума на участке, в соответствии с уровнем звукового давления внутри зоны, были выделены цветом так, что снижение уровня звукового давления происходит от красного (95,0 дБ) к темно-фиолетовому (89,0 дБ) [9].

Проведенные исследования показали, что каждый ИШ создает свое уникальное звуковое поле. Поле наиболее высокого уровня (от 89,3 до 92,1 дБ, при норме 75 дБ) расположено на расстоянии в среднем 2 м от ИШ [8]. При этом именно в указанной зоне расположены рабочие места операторов, обслуживающих оборудование. Отметим, что на исследуемом участке операторы подвергаются воздействию полей шума от источников, расположенных на расстоянии 5 м друг от друга. Это отчетливо прослеживается по общей зоне суммирования полей шума от ИШ6 и ИШ7, выделенной на рис. 2 синим цветом [9].

Помимо операторов станков, звуковое поле со значениями звукового давления от 89,0 до 89,2 дБ (зона темно-фиолетового цвета), общей площадью 140 м^2, также превышает нормативные значения и может воздействовать

This graphical model is a general field of noise propagation on the site. It should be noted that the noise fields at the site, in accordance with the sound pressure level inside the zone were highlighted so that the reduction in sound pressure level goes from red (95.0 dB) to dark purple (89.0 dB) [9].

The studies have shown that each NS creates its own unique sound field. The field of the highest level (from 89.3 to 92.1 dB, at a rate of 75 dB) is located at a distance of approximately 2 m from the NS [8]. It is precisely in this area where there are workplaces of operators serving equipment. It should be noted that at the site the operators are exposed to the noise fields from the sources located at a distance of 5 m from each other. This is evident by the total area summation of the noise fields from NS 6 and NS 7, which are highlighted in Fig. 2 in blue [9].

In addition to operators, a sound field with sound pressure values from 89.2 to 89.0 dB (dark purple area), with a total area of 140 m^2, also exceeds normative values and can affect the

на работников механического участка, чья профессиональная деятельность не связана с обслуживанием какого-либо оборудования, являющегося источником повышенного уровня шума [9].

Комплексная математическая модель. Для реализации комплексной математической модели было решено воспользоваться программной средой *Mathcad Application*, версии 15.0. Данный выбор был осуществлён в связи с тем, что программная среда *Mathcad* относится к классу специальных систем автоматизированного проектирования, ориентированных на подготовку интерактивных документов с визуальным сопровождением вычислений [10]. Кроме того, среда отличается относительной простотой использования и имеет интуитивный интерфейс пользователя. Набор функций полностью удовлетворяет всем инженерным требованиям промышленной акустики.

Отметим основные допущения моделирования:

- выражение (1) состоит из двух элементов: первый — уровень звукового давления прямого звука ($L_п$), второй — отраженного ($L_о$); итоговый уровень звукового давления (L_p) — сумма результатов вычислений первого и второго элементов;
- модель разрабатывалась для УЗД на среднегеометрической частоте 1000 Гц;
- переменные χ, *B*, Ф (в программных расчётах — $Ф_о$), ψ, а также шумовые характеристики источников L_1=99 дБ (ИШ1), L_2=91 дБ (ИШ6), L_3=101 дБ (ИШ7) соответствуют среднегеометрической частоте 1000 Гц;
- для построения графика участка введены значения координат *x*, *y*, *z* всех трёх ИШ, при этом ИШ1 соответствуют координаты *x*1, *y*1, *z*1, ИШ6 — *x*2, *y*2, *z*2, а ИШ7 — *x*3, *y*3, *z*3. Для получения модели в трёхмерном пространстве задано контрольное значение координаты *z*, равное 2;
- источники шума приняты точечными, пульсирующими в пространстве ($S=4\pi r$);

workers of the mechanical area whose professional activity is not connected with service of any equipment that is a source of high level noise [9].

Integrated mathematical model. For the implementation of an integrated mathematical model, it was decided to use the software environment *Mathcad Application*, version 15.0. This choice was made due to the fact that the software *Mathcad* belongs to a class of special computer-aided design, for the preparation of interactive documents with visual computing [10]. In addition, the environment is relatively easy to use and has an intuitive user interface. The function set meets all engineering requirements of industrial acoustics.

Let us note the main assumptions of the simulation:

- the expression (1) consists of two elements: the first is the sound pressure level of the direct sound ($L_п$), the second — of the reflected one ($L_о$); the resulting sound pressure level ($L_р$) is the sum of the calculation results of the first and second elements;
- the model was developed for SPL at a geometric mean frequency of 1000 Hz;
- the variables χ, *B*, Ф (in the software calculations — $Ф_о$), ψ, and noise characteristics of sources L_1=99 dB (NS 1), L_2=91 dB (NS 6), L_3=101 dB (NS 7) correspond to the geometric mean frequency of 1000 Hz;
- to construct the graph of the site we enter the coordinates *x*, *y*, *z* of all three NSs, with NS 1 corresponding to the coordinates *x*1, *y*1, *z*1, NS 6 — *x*2, *y*2, *z*2, and NS 7 — *x*3, *y*3, *z*3. To get a model in three-dimensional space we set the reference value of z-coordinate, which equals to 2;
- the noise sources are believed to be point, pulsating in space ($S=4\pi r$);

- площадь ограждающих поверхностей составляет 812 м^2, в неё входят площадь стен и потолка;
- α=0,1 при отсутствии звукопоглощающих облицовок.

Описанные условия, характеристики и выражения были занесены в документ, созданный в *Mathcad* 15.0. На рис. 5 представлен фрагмент разработанной математической модели.

- the area of the enclosing surfaces is 812 m^2, it includes area of the walls and the ceiling;
- α=0,1 in the absence of sound-absorbing linings.

The described conditions, characteristics and expressions were written in a document that was created in *Mathcad* 15.0. Fig. 5 shows a fragment of the developed mathematical model.

$$L1 := 99 \qquad L2 := 101 \qquad L3 := 91 \qquad S := 812$$

$$B := 107.8 \qquad \chi := 1 \qquad Фо := 1 \qquad \alpha := 0.1 \qquad \psi := 1$$

$$x1 := 18.4 \qquad y1 := 11.9 \qquad z1 := 1 \qquad z := 2$$

$$x2 := 3.5 \qquad y2 := 4.2 \qquad z2 := 1$$

$$x3 := 3 \qquad y3 := 10.4 \qquad z3 := 1$$

$$Lп(x,y) := \left(\frac{1}{4\cdot\pi}\right)\cdot\left[\frac{10^{0.1\cdot L3}\cdot\chi\cdot Фо}{\left[(x-x3)^2+(y-y3)^2+(z-z3)^2\right]}+\frac{10^{0.1\cdot L2}\cdot\chi\cdot Фо}{\left[(x-x2)^2+(y-y2)^2+(z-z2)^2\right]}+\frac{10^{0.1\cdot L1}\cdot\chi\cdot Фо}{\left[(x-x1)^2+(y-y1)^2+(z-z1)^2\right.}\right.$$

$$Lo(x,y) := \left(\frac{4\cdot\psi}{\alpha\cdot S}\right)\cdot\left[\left(10^{0.1\cdot L1}+10^{0.1L2}+10^{0.1L3}\right)\cdot(1-\alpha)\right]$$

$$Lp(x,y) := 10\cdot\log(Lп(x,y)+Lo(x,y))$$

Рис. 5. Фрагмент математической модели, созданной в *Mathcad* 15.0

Fig. 5. A fragment of the mathematical model created in Mathcad 15.0

Финальной стадией разработки явилось построение 3*D*-графика по описанным зависимостям — графика уровня звукового давления L_p. Изначально был построен график поверхности с соблюдением соотношений всех геометрических размеров помещения, изображённый на рис. 6. Для наглядности восприятия применён компонент «карта цветов» по приращению *z* (L_p) — «Радуга».

The final stage of the development was the construction of a 3D graphics according to the described dependencies - the graph of sound pressure level L_p. Originally the graph of the surface was built with the observance of the ratios of all geometric dimensions of the room depicted in Fig. 6. For better visual perception we applied the "color map" on the increment z (L_p) — "rainbow".

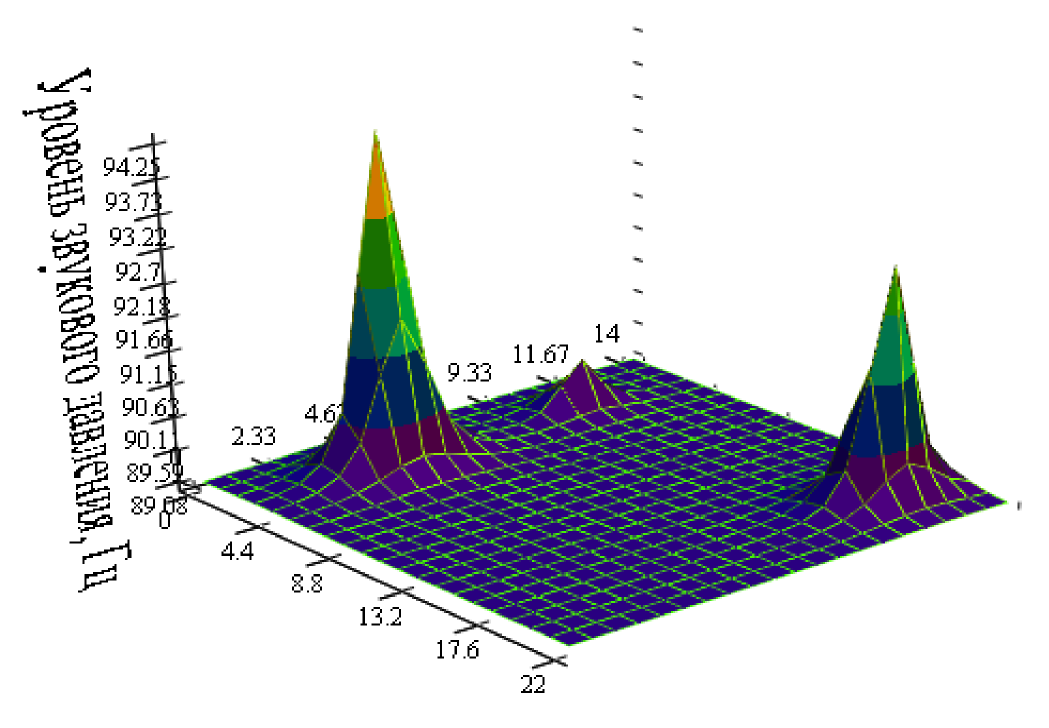


Рис. 6. График поверхности УЗД

Fig. 6. The graph of SPL surface

Однако данный вид 3*D*-графика, несмотря на свою наглядность, не позволяет проследить с необходимой точностью распределение уровней звука в пространстве, поэтому было принято решение о замене графика поверхности «линиями уровня», рис. 7.

However, this kind of 3D graphics, despite its visual aspects, does not allow us to trace with precision the distribution of sound levels in space, so the decision was made to replace the graphics surface with "level lines", Fig. 7.

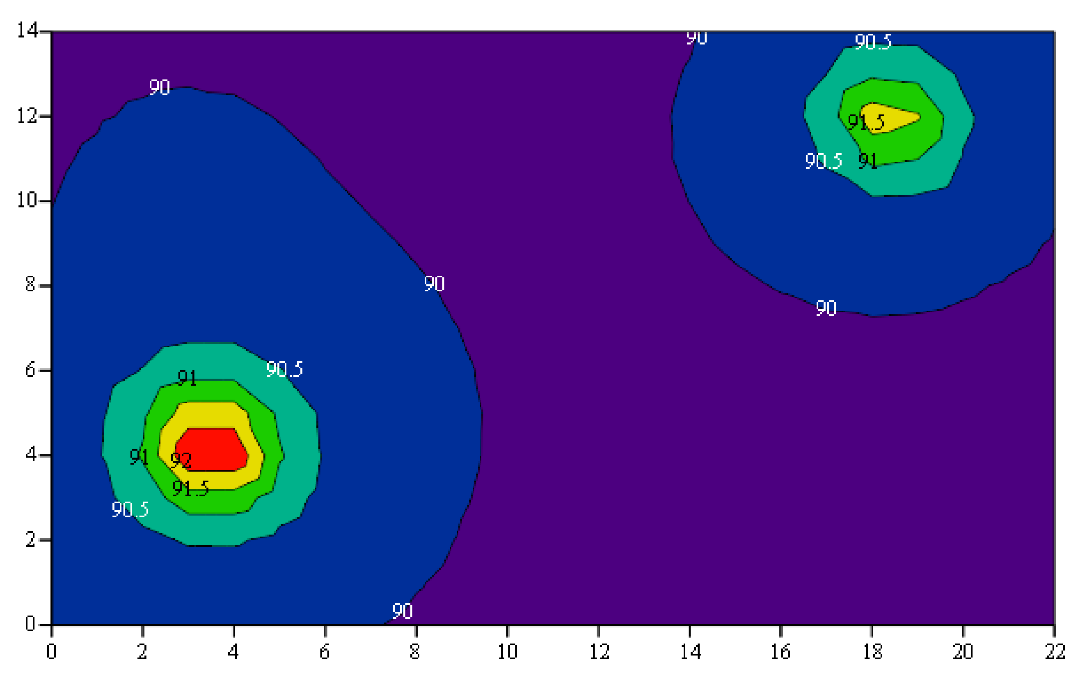


Рис. 7. Линии уровня ЗД

Fig. 7. PL level lines

На полученном графике ярко выражено суммирование энергий и образование области с одинаковыми показателями УЗД, равными 90 дБ, охватывающей два соседних источника шума: ИШ6 и ИШ7. ИШ1 не попадает в эту область в связи с его удалённостью от двух остальных источников.

В целях проверки адекватности разработанной модели было проведено сравнение шумовых полей, полученных в результате расчета (рис. 4) и моделирования (рис. 7). Сравнительный анализ показывает, что шумовые картины графиков имеют сходные черты (дублируется характерная область суммации шумовых полей ИШ6 и ИШ7), а также что расхождения в данных цветовых областей незначительны и составляют от 0,5 до 3 дБ (что пренебрежимо мало для акустических расчетов) при коэффициенте корреляции 0,87–0,95.

Полученные выводы дают основание характеризовать разработанную модель как адекватную, что позволяет проводить дальнейшие исследования распределения УЗД на участке с использованием различных комбинаций работающих источников согласно технологическому процессу.

Исследование эффективности шумозащиты с помощью разработанной модели. Доказанная адекватность разработки позволяет использовать предлагаемую модель в области оценки эффективности шумозащиты, что подтверждают графики УЗД, представленные на рис. 8–10. Так, на рис. 8 изображен график УЗД механического участка при применении звукопоглощающей облицовки с коэффициентом звукопоглощения на среднегеометрической частоте 1000 Гц при α=0,5, на рис. 9 при α=0,7, а на рис. 10 при α=0,9.

On the resulting chart, it is evident the summation of energies and the formation of an area with the same SPL of 90 dB, covering the two neighboring noise sources: NS 6 and NS 7. NS 1 does not fall into this region due to its distance from the other two sources.

In order to verify the adequacy of the developed model we have compared the noise fields, obtained in the result of the calculation (Fig. 4) and the simulation (Fig. 7). The comparative analysis shows that the noise pattern graphs have similarities (the same characteristic region of the summation of noise fields NS 6 and NS 7), and also that the difference in the color areas are minor and range from 0.5 to 3 dB (which is negligible for the acoustic calculations) with the correlation coefficient 0.87–0.95.

The findings provide a basis to characterize the developed model as adequate, allowing further studies of the distribution of SPL at the site using different combinations of sources according to the technological process.

The study of the efficiency of noise protection using the developed model. The proven adequacy of the design allows us to use the proposed model in evaluation of the effectiveness of noise insulation, which is confirmed by the graphs of SPL, shown in Fig. 8-10. Thus, Fig. 8 shows a graph of SPL mechanical part when using sound-absorbing lining with a coefficient of absorption at a geometric mean frequency of 1000 Hz when α=0,5, and in Fig. 9 with α=0,7, in Fig. 10 with α=0,9.

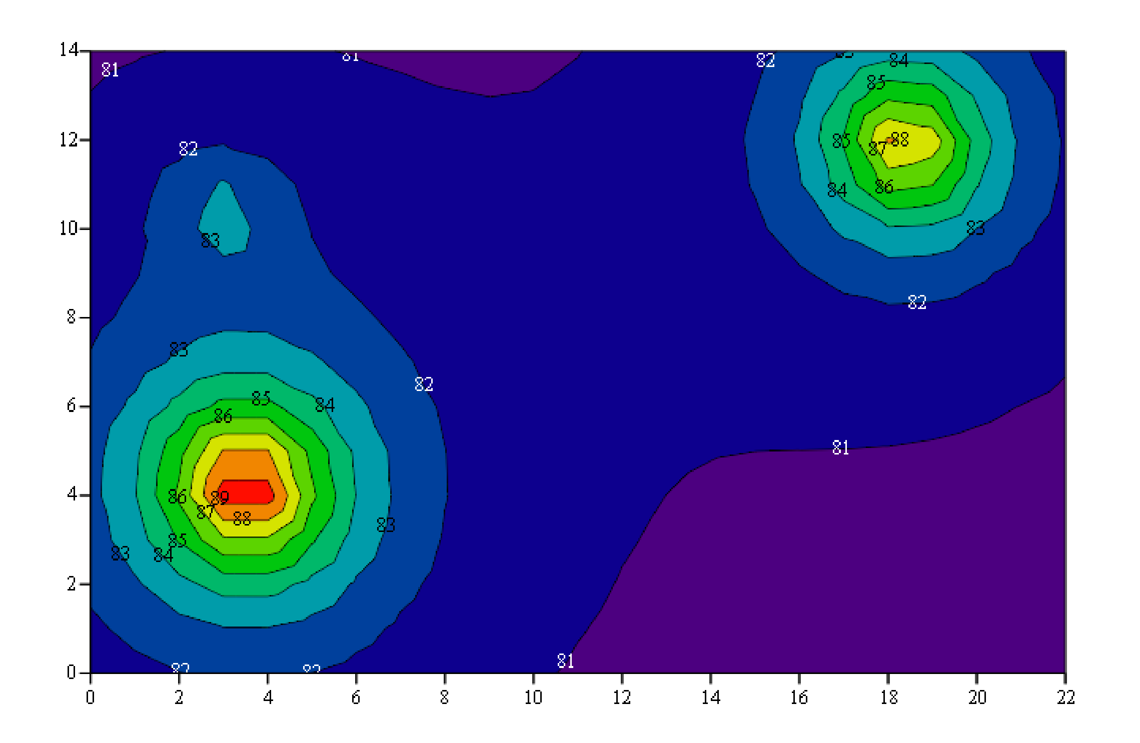


Рис. 8. УЗД при *α*=0,5

Fig. 8. SPL with α=0,5

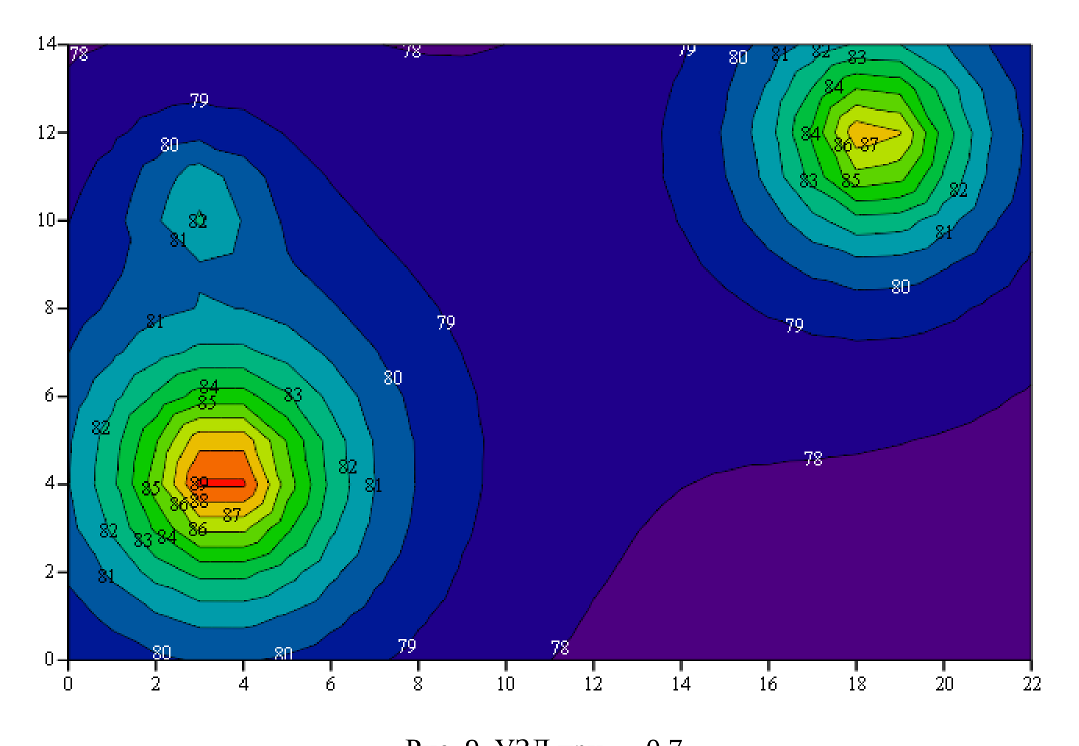


Рис. 9. УЗД при *α*=0,7

Fig. 9. SPL with α=0,7

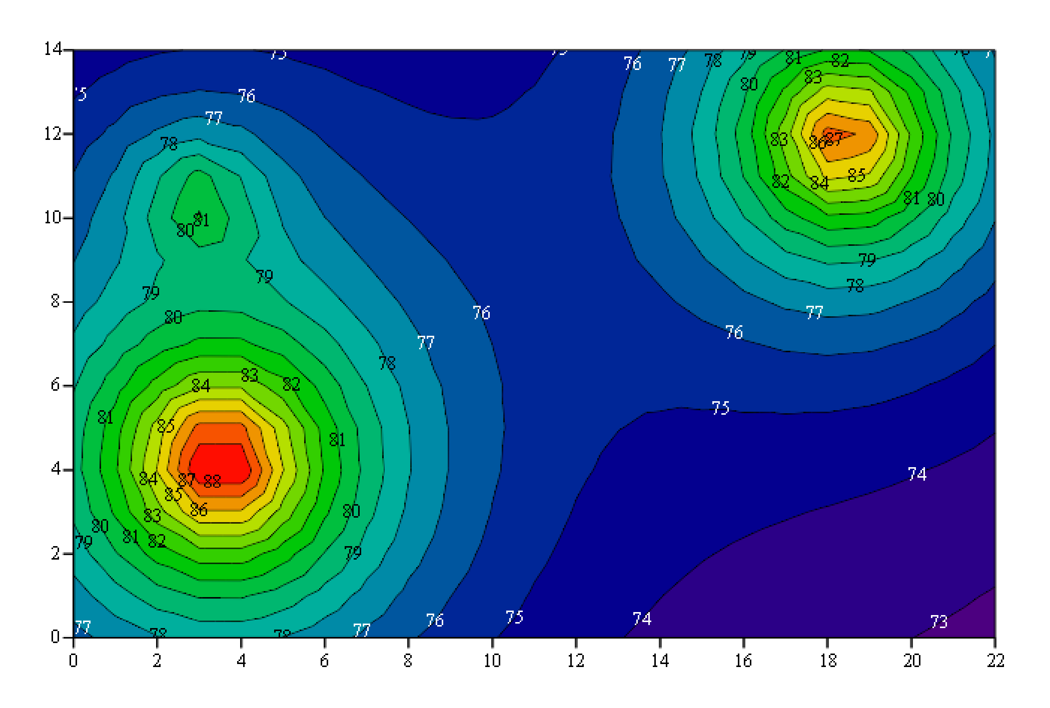


Рис. 10. УЗД при α=0,9

Fig. 10. SPL at α=0,9

Изменение границ распространения полей шума является наглядным отображением повышения эффективности шумозащиты при увеличении коэффициента звукопоглощения α от 0,5 до 0,9 (наблюдается снижение УЗД на рабочих местах на 8–13 дБ).

Заключение. Результаты исследования указывают на то, что применение разработанной математической модели позволяет:

- исследовать особенности распространения и выявить участки наибольшей концентрации (участки суммации) шума в производственном помещении [12];
- оценить вероятность расположения рабочих мест в зонах с превышением уровня звукового давления [11];
- выполнить анализ рационального размещения оборудования и рабочих мест в производственном помещении с учетом влияния акустического фактора [13, 14];
- предложить наиболее эффективные методы и средства снижения шума, а также оценить эффективность существующих средств коллективной защиты [13, 14].

По итогам проделанной работы авторы

Boundaries change of the noise fields is a clear example of the increase in the efficiency of noise protection with increasing absorption coefficient α from 0,5 to 0,9 (a decrease of SPL at the workplace 8–13 dB).

Conclusion. The results of the study indicate that the application of the developed mathematical model makes it possible:

- to study peculiarities of distribution and to identify the areas of greatest concentration (summation areas) of noise in the workplace [12];
- to assess the probability of the location of workplaces in areas with higher sound pressure level [11];
- to perform analysis of rational location of equipment and workplaces in the production area taking into account the influence of acoustic factors [13, 14];
- to offer the most effective methods and means of noise reduction, as well as to assess the effectiveness of existing collective protection [13, 14].

On that basis, the authors consider it possible

считают возможным рекомендовать внедрение модели и отдельных её компонентов в следующие процессы:

- проектирование и анализ акустической нагрузки производственных помещений, оценка шумового загрязнения окружающей среды;
- подготовка бакалавров направления «Техносферная безопасность» (при разработке электронных учебно-методических комплексов);
- дополнительное образование по направлению «Техносферная безопасность» (для обучения использованию информационных технологий при акустических расчетах);
- обучение работников промышленных предприятий основам охраны труда (в качестве наглядного материала);
- процедура специальной оценки условий труда (для оценки акустического фактора).

Библиографический список.

1. Алексеев С. В. Производственный шум / С. В. Алексеев и др. — Ленинград : Медицина, 1991. — 136 с.

2. Иванов, Н. И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом / Н. И. Иванов. — Москва : Логос, 2013. — 423 с.

3. Акустика. Рекомендуемые методы проектирования малошумных рабочих мест производственных помещений. Часть 3. Распространение звука в производственных помещениях и прогнозирование шума : ГОСТ Р 52797.3–2007 [Электронный ресурс] / Библиотека ГОСТов и нормативов. — Режим доступа : https://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/53/53204/ (дата обращения : 26.02.17).

4. Методы измерения шума на рабочих местах (с Изменением № 1) : ГОСТ 12.1.050-86 ССБТ. Межгосударственный стандарт [Электронный ресурс] / Библиотека ГОСТов и нормативов. — Режим доступа :

to recommend the implementation of the model and its individual components in the following processes:

- design and analysis of acoustic load of production areas, assessment of noise pollution of the environment;
- preparation of bachelors in "Technosphere safety" (when developing electronic educational-methodical complexes);
- additional education in "Technosphere safety" (training in the use of information technology in acoustic calculations);
- training of industrial workers in the basics of occupational safety (illustrative material);
- procedure for special assessment of working conditions (for the evaluation of the acoustic factor).

References.

1. Alekseev, S.V. et al. Proizvodstvenny shum. [Industrial noise.] Leningrad, Meditsina, 1991, 136 p. (in Russian).

2. Ivanov, N.I. Inzhenernaya akustika. Teoriya i praktika bor'by s shumom. [Engineering acoustics. Theory and practice of noise control.] Moscow, Logos, 2013, 423 p. (in Russian).

3. Akustika. Rekomenduemye metody proektirovaniya maloshumnykh rabochikh mest proizvodstvennykh pomesheniy. Chast' 3. Rasprostranenie zvuka v proizvodstvennykh pomesheniyakh i prognozirovanie shuma: GOST R 52797.3–2007. Biblioteka GOSTov i normativov. [Acoustics. Recommended methods for designing low-noise workplaces of industrial premises. Part 3. Sound propagation in industrial premises and noise forecasting: GOST R 52797.3–2007. Library of standards and regulations.] Available at: https://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/53/53204/ (accessed: 26.02.17) (in Russian).

4. Metody izmereniya shuma na rabochikh mestakh (s izmeneniem no.1) GOST 12.1.050-86 SSBT. Mezhgosudarstvenny standart. Biblioteka GOSTov i normativov. [Methods of noise measurement at work places (with amendment no. 1): GOST 12.1.050-86 SSBT. Interstate standard. Library of standards and

https:// ohranatruda.ru /ot_biblio /normativ/data_normativ/6/6337/ (дата обращения : 15.02.17).

5. Измерения шума для оценки его воздействия на человека : ГОСТ Р ИСО 9612-2013 [Электронный ресурс] / Профессиональные справочные системы Техэксперт. Нормы, правила, стандарты по техрегулированию. — Режим доступа : http://docs.cntd.ru/document/1200107818 (дата обращения : 20.02.17).

6. Шабарова, О. Н. Построение полей распространения шума на участке листовой штамповки металлообрабатывающего предприятия / О. Н. Шабарова, С. В. Бойко, А. А. Пасхина. — Кострома, изд-во КГТУ, 2013 — 693 с.

7. Шум машин. Определение уровней звуковой мощности источников шума по звуковому давлению : ГОСТ Р 51401–99 (ИСО 3744–94) [Электронный ресурс] / Профессиональные справочные системы Техэксперт. Нормы, правила, стандарты по техрегулированию. — Режим доступа : http:// docs.cntd.ru /document/1200107818 (дата обращения : 20.02.17).

8. Защита от шума. Актуализированная редакция : СНиП 23-03-2003. СП 51.13330.2011 [Электронный ресурс] / Профессиональные справочные системы Техэксперт. Нормы, правила, стандарты по техрегулированию. — Режим доступа : http://docs.cntd.ru/document/1200084097 (дата обращения : 20.01.17).

9. Заяшникова, К. А. Построение полей распространения шума на участке механической обработки / К. А. Заяшникова, И. В. Богданова — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2016. — 47 с.

regulations.] Available at: ohranatruda.ru /ot_biblio /normativ/data_normativ/6/6337/ (accessed: 15.02.17) (in Russian).

5. Izmeremiya shuma dlya otsenki ego vozdeystviya na cheloveka: GOST R ISO 9612-2013. Professional'nye spravochnye sistemy Tekhekspert. Normy, pravila, standarty po tekhregulirovaniyu. [Noise measurement for evaluation of its effect on human: GOST R ISO 9612-2013. Professional reference system Tekhexpert. Rules, regulations, standards on technical regulation.] Available at: http://docs.cntd.ru/document/1200107818 (accessed: 20.02.17) (in Russian).

6. Shabarova, O.N., Boyko, S.V., Paskhina, A.A. Postroenie poley rasprostraneniya shuma na uchastke listovoy shtampovki metalloobrabatyvayushego predpriyatiya. [Construction of fields of noise propagation on sheet metal stamping of metal working enterprise.] Kostroma, Izdatel'stvo KSTU, 2013, 693 p. (in Russian).

7. Shum mashin. Opredelenie urovney zvukovoy moshchnosti istochnikov shuma po zvukovomu davleniyu: GOST R 51401-99 (ISO 3744-94). Professional'nye spravochnye sistemy Tekhekspert. Normy, pravila, standarty po tekhregulirovaniyu. [Car noise. Determination of sound power levels of noise sources through sound pressure: GOST R 51401-99 (ISO 3744-94). Professional reference system Tekhexpert. Rules, regulations, standards on technical regulation.] Available at: http:// docs.cntd.ru /document/1200107818 (accessed: 20.02.17) (in Russian).

8. Zashita ot shuma. Aktualizirovannaya redaktsiya: SNiP 23-03-2003. SP 51.13330.2011. Professional'nye spravochnye sistemy Tekhekspert. Normy, pravila, standarty po tekhregulirovaniyu. [Protection from noise. Updated version: SNiP 23-03-2003. SP 51.13330.2011. Professional reference system Tekhekspert. Rules, regulations, standards on technical regulation.] Available at: http://docs.cntd.ru/document/1200084097 (accessed: 20.01.17) (in Russian).

9. Zayashnikova, K.A., Bogdanova, I. V. Postroenie poley rasprostraneniya shuma na uchastke mekhanicheskoy obrabotki. [Construction of fields of noise propagation on the part mechanical processing.] Rostov-on-Don, Izd. tsentr of DSTU, 2016, 47 p. (in Russian).

10. Заяшникова, К. А. Подготовка лабораторной работы по дисциплине «Промышленная акустика» / К. А. Заяшникова, И. В. Богданова. — Краснодар : ИПЦ КубГУ, 2017. — 60 с.

11. *Mathcad* / Википедия. Свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/Mathcad (дата обращения : 10.03.2017).

12. Чукарин, А. Н. Теория и методы акустических расчетов и проетирования технологических машин для механической обработки / А. Н. Чукарин. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2004. — 152 с.

13. Аствацатуров, А. Е. Расчёты по безопасности и экологичности процессов и производств / А. Е. Аствацатуров. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2004. — 77 с.

14. Месхи, Б. Ч. Расчет и выбор технических средств обеспечения безопасности / Б. Ч. Месхи. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2009. — 191 с.

10. Salnikova, K. A. Podgotovka laboratornoy raboty po distsipline “Promyshlennaya akustika”. [Preparation of laboratory work on discipline “Industrial acoustics”.] Krasnodar, IPTS KubGU, 2017, 60 p. (in Russian).

11. Mathcad. Wikipedia. Free encyclopedia. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Mathcad (accessed: 10.03.2017) (in Russian).

12. Chukarin, A.N. Teoriya i metody akusticheskikh raschetov i proektirovaniya tekhnologicheskikh mashinbdlya mekhanicheskoy obrabotki. [Theory and methods of acoustic calculations and designing of technological machines for machining.] Rostov-on-Don: Izd. tsentr DSTU, 2004, 152 p. (in Russian).

13. Astvatsaturov, A.E. Raschety po bezopasnosti i ekologichnosti protsessov i proizvodstv. [Calculations of safety and environmental performance of processes and production.] Rostov-on-Don: Izd. tsentr DSTU, 2004, 77 p. (in Russian).

14. Meskhi, B.C. Raschet i vybor tekhnicheskikh sredstv obespecheniya bezopasnosti. [Calculation and selection of technical means of safety provision.] Rostov-on-Don: Izd. tsentr DSTU, 2009, 191 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 03.05.2017
Сдана в редакцию 05.05.2017
Запланирована в номер 05.06.2017

Received 03.05.2017
Submitted 05.05.2017
Scheduled in the issue 05.06.2017

Богданова Ирина Виссарионовна,
кандидат технических наук, доцент Донского государственного технического университета,
(РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)
bogirka@gmail.com

Лоскутникова Инна Николаевна,
Кандидат химических наук, доцент Донского государственного технического университета,
(РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)
Lvica.inna@yandex.ru

Заяшникова Кристина Александровна,
Бакалавр Донского государственного технического университета,
(РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)
kristall-net7@yandex.ru

Bogdanova Irina Vissarionovna,
Cand. of techn. Sciences, Associate professor of Don State Technical University (Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, Russian Federation)
bogirka@gmail.com

Loskutnikova Inna Nikolaevna
Cand. of chem. Sciences, Associate professor of Don State Technical University (Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, Russian Federation)
Lvica.inna@yandex.ru

Zayashnikova Kristina Aleksandrovna,
Bachelor’s degree student of Don State Technical University (Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, Russian Federation)
kristall-net7@yandex.ru